



*Проведено огляд основних історичних етапів розробки силових напівпровідникових ключів та виконано аналіз сучасного стану розвитку керованих силових напівпровідникових приладів; зроблено прогноз щодо перспективи розвитку сучасних керованих напівпровідникових ключів*



**УДК 621.313.17**

**А.Г. Сосков**, д.т.н.,

**Ю.П. Колонтаєвський**, к.т.н.,

**Я.Б. Форкун** к.т.н.,

**Н.О. Сабалаєва**

*Харківська національна академія міського господарства*

**І.О. Соскова**, к.т.н.

*Українська інженерно-педагогічна академія*

## **СУЧАСНИЙ СТАН І ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ КЕРОВАНИХ СИЛОВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ І ЙОГО ВПЛИВ НА РОЗВИТОК КОМУТАЦІЙНИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ АПАРАТІВ**

**Вступ.** Керовані силові напівпровідникові прилади (СНП) входять до складу напівпровідникових ключів (НК) як гібридних, так і безконтактних напівпровідникових апаратів, що забезпечують бездугову комутацію потоків електричної потужності, тобто виконують основну силову функцію комутаційного апарату. У якості силового безконтактного елемента в НК у наш час частіше за все застосовуються одноопераційні СНП (тиристорні, симісторні, оптронні симісторні) та двоопераційні (IGBT, GTO-тиристорні, IGCT) [1].

Багаторічний досвід розробки і виробництва комутаційних напівпровідникових апаратів показує, що їх прогрес безпосередньо пов'язаний, у першу чергу, з успіхами силових електроніки в області розробки і промислового виробництва керованих силових напівпровідникових приладів. Саме їх техніко-економічні показники визначають масогабаритні, вартісні й функціональні характеристики комутаційних напівпровідникових апаратів [1]. Тому для визначення перспектив розвитку напівпровідникових апаратів і вибору напрямків з їх удосконалення необхідно розглянути, в якому напрямку і з якими досягненнями йде у світі розвиток силових напівпровідникових ключів. З цією метою було проведено огляд літератури [2 - 14].

**Еволюція розвитку силових напівпровідникових ключів (Основні етапи розвитку силових напівпровідникових ключів).** Проведемо огляд основних історичних етапів розробки силових ключів і стисло оцінимо отримані при цьому результати. В спеціальній літературі прийнято поділення на наступні етапи, які наведені нижче в хронологічному порядку [2].

**Етап 1.** Кінець 40-х – початок 60-х років. Розробка основних типів керованих НК (біполярних і уніполярних транзисторів) на основі відомих теорій твердотільної електроніки. Підвищення потужності приладів досягається за рахунок збільшення фізичних розмірів структури. Для тиристорних ключів подібний підхід забезпечує збільшення комутаційних струмів до 100 А за напруги до 1000 В. Для транзисторів як і раніше залишається актуальною задача розробки приладу на великі струми з хорошими динамічними показниками.

**Етап 2.** Кінець 50-х – початок 70-х років. Розробка перших НК на основі вертикальних і багатоканальних структур. Поява планарної та епітаксильної технологій, а також вдосконалення технології дифузії в напівпровідникові структури. Освоюється серійне виробництво потужних біполярних і польових транзисторних ключів, здатних розсіювати потужність у декілька ват і потужних тиристорних ключів на струми до 630 А за напруги до 1500 В. Практичне використання потужних тиристорів дозволило виявити сильні і сла-

бкі сторони біполярних і уніполярних приладів, і сформулювати завдання створення більш сучасної комбінованої структури.

Етап 3. 70-і роки. Розробка складених транзисторних і тиристорних ключів на дискретних елементах, що поєднують переваги біполярних і польових приладів. Цей період можна характеризувати як етап схемотехніки напередодні нового технологічного стрибка.

Етап 4. Кінець 70-х – початок 80-х років. Застосування вдосконалених підходів інтегральної електроніки в технології силових НК. Розробка потужних гібридних модулів і створення перших поколінь складених біполярно-польових монолітних структур. В цей відрізок часу вдається підвищити потужність, що перемикається приладами, більш ніж в 100 разів. Для транзисторних ключів рівень комутованих струмів і напруг складає сотні ампер і тисячі вольт. Тиристорні ключі стають повністю керованими і охоплюють мегаватний діапазон потужностей.

Етап 5. 90-і роки. Удосконалення технології НК в заданому діапазоні потужностей і граничних напруг. Цей період характеризується поліпшенням якісних показників ключових приладів за швидкодією і залишковими напругами.

Етап 6. Кінець 90-х років – теперішній час. Розробка нових поколінь силових ключів із застосуванням субмікронних технологій. Впровадження керуючих структур з ізолюваним затвором в структури потужних тиристорних ключів. Широке вживання «розумних» або «інтелектуальних» приладів, здатних вирішувати цілий спектр задач як у галузі керування і захисту, так і у діагностиці. Кінець XX століття і початок XXI століття як і раніше демонструють тенденцію до створення універсального НК, керованого по ізолюваному затвору з потужністю перемикавання, що відповідає «тиристорному діапазону» і залишковою напругою, близькою до прямої напруги звичайного діода. Продовжується подальше удосконалення одноопераційних (біполярних) тиристорних ключів у бік підвищення комутованих струмів і напруг понад 10 кА і 10 кВ відповідно.

Таким чином, ми бачимо, що півстолітній шлях еволюційного розвитку НК був спрямований до створення ключа з «ідеальними властивостями», який повинен мати залишкову напругу і струми витоку рівні нулю, миттєво перемикає нескінченно великі струми і блокує нескінченно великі напруги за нульової потужності керування. Мабуть, цього можливо досягти тільки у віртуальних задачах, наприклад, при моделюванні електронних схем на ЕОМ. Практичні ж ключі можуть лише в тому чи іншому ступеню наближатися до ідеальних.

Як видно з наведеного історичного огляду, саме у 80-х роках почався найдинамічніший етап розвитку силової електроніки, пов'язаний з впровадженням у технологію керованих СНП вдосконалених методів інтегральної електроніки. Завдяки цьому було створено повністю керовані СНП з параметрами, що наближаються до ключа з «ідеальними властивостями». Серед них найбільше практичне вживання знайшли потужні біполярні транзистори з ізолюваним затвором (IGBT) та двоопераційні тиристори або тиристори, що зазираються типів GTO, GCT і IGCT та їх інтегральні збірки.

IGBT є компромісним рішенням, що дозволяє об'єднати позитивні властивості польового керування та біполярної провідності і є, таким чином, транзистором з комбінованою структурою. У даний час IGBT є найдосконалішим ключовим приладом комбінованого типу з тих, що серійно випускається. Діапазони струмів і напруг IGBT швидко розширюються і зараз вони практично повністю витіснили у перетворювальній техніці решту типів ключів в діапазоні потужностей від одиниць до тисяч кВА.

Проте, слід зазначити ряд недоліків цих приладів, зумовлених фізичними особливостями роботи: значне для біполярного ключа падіння напруги у відкритому стані, схильність до самочинного вмикання у тиристорному режимі (ефекту «заклацування») і, як наслідок, знижена стійкість до струмів короткого замикання, відносно невисока у порівнянні з МДН-аналогами швидкодія.

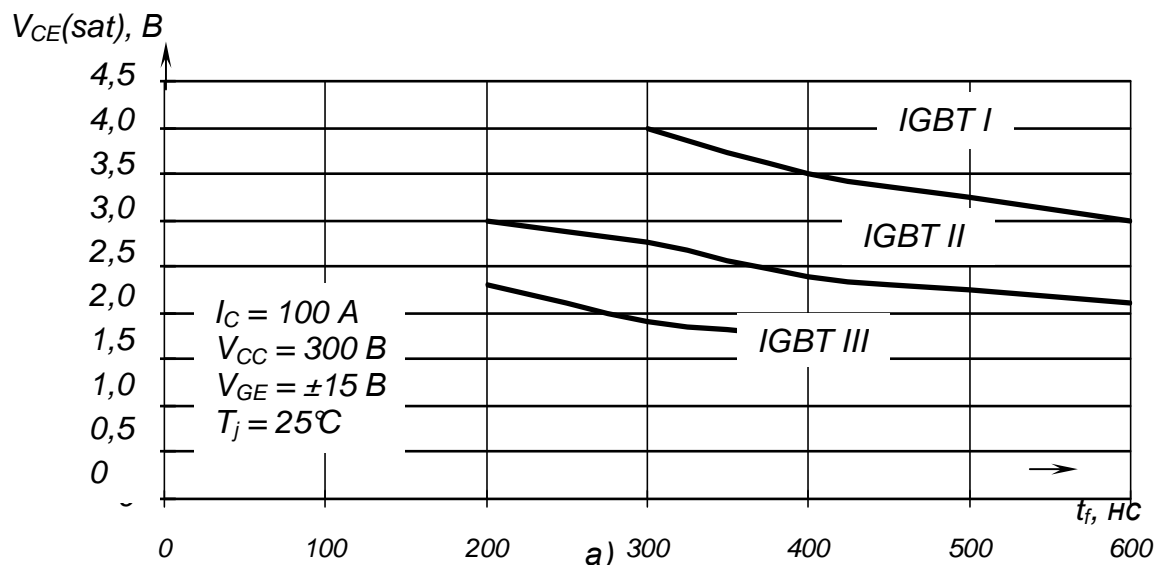
Перше покоління IGBT (початок 80-х років) по густині струму в 20 разів перевершувало МДН і в 5 разів біполярні транзистори, хоча мало відносно високі час вимикання

(10 – 20 мкс) і напругу у ввімкненому стані (4 – 5) В. Удосконалення технології керування часом життя неосновних носіїв підвищило швидкодію IGBT до 200 – 300 нс. До кінця 80-х років були розроблені прилади другого покоління як дискретного, так і модульного типів на струми від десятків до сотень ампер з напругою блокування до 1200 В.

Введення в структуру транзистора додаткового високолегованого p+-шару, що називається буферним, дозволило підвищити рівень пробивних напруг і швидкість перемикання. Діапазон робочих струмів IGBT розширюється до сотень ампер завдяки використанню модульних конструкцій півмостових і мостових конфігурацій. Таким чином, до кінця 90-х років застосовується вже третє покоління цих транзисторів. Як одні з найефективніших можна відзначити модулі серії ECONOPACK у фірми Siemens і U-SERIES у фірми Mitsubishi Electric.

На рис. 1 наведено залежність напруги насичення від часу спаду струму колектора для IGBT-ключів перших трьох поколінь, що наочно ілюструє тенденцію до зниження залишкової напруги і показує подальшу актуальність цієї задачі.

У 90-і роки після розробки так званих HV-структур IGBT (High Voltage) на клас напруг 1700 В було нарешті досягнуто високовольтного діапазону від 1300 В і більше, що традиційно вважався тиристорним. В основу такого високовольтного ключа покладено гомогенну структуру IGBT, виконану за планарно-епітаксіальною технологією – NPT-структуру. Для захисту від пробоя застосовано полікристалічне кремнієве охоронне кільце, що зменшувало кривизну поверхневих полів. Для зменшення залишкових напруг в структурі оптимізувався термін життя носіїв, ключі були розроблені на струми до 300 А і мали залишкову напругу (2,5 – 4) В при частоті перемикань до 50 кГц. Аналогічні ключі було розроблено і на основі використання епітаксіальної структури – PT-структури IGBT, що дозволило зменшити залишкову напругу до 2,7 В при струмі 400 А. Вже наприкінці 90-х років з'явилися розробки HV-IGBT на напруги 2500 – 3000 В.



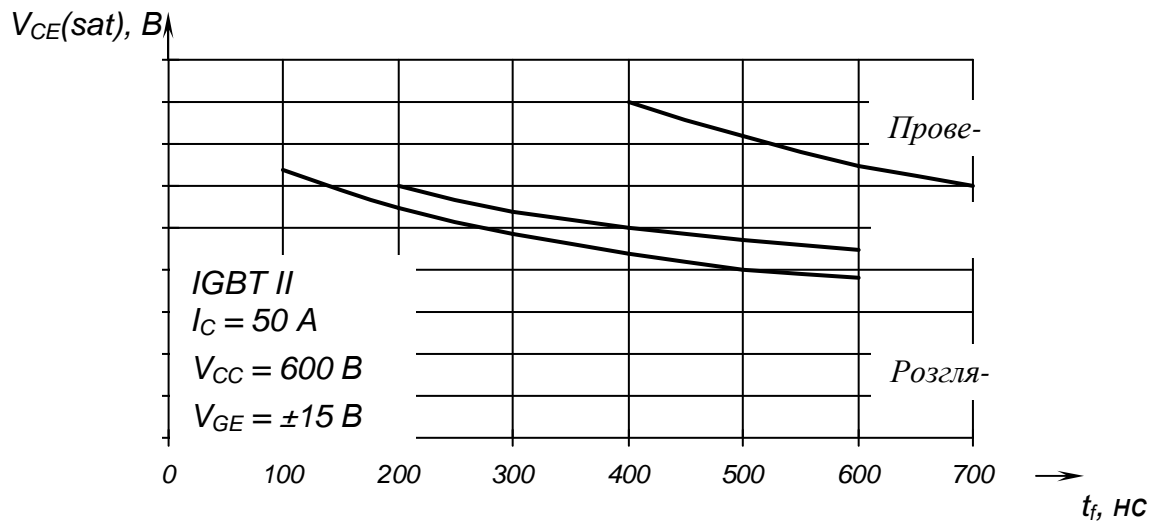


Рис. 1. Залежність напруги насичення IGBT-ключів різних поколінь від часу спаду колекторного струму: а) – клас напруги 600 В; б) – клас напруги 1200 В

Наприкінці 90-х років компанія Mitsubishi Electric розробила нову технологію четвертого покоління для приладів PT-IGBT на основі вертикального затвору Trench Gate. Головним результатом вживання Trench-технології стало істотне зменшення статичних втрат IGBT і вихід на новий рівень залишкових напруг: 1,6 В для приладів на 600 В і 1,8 В для приладів на 1200 В (рис. 2). Крім того, в ці прилади (серії F) було додатково введено схему захисту транзистора від короткого замикання RTC (Real Time Control Circuit), призначену для миттєвого зменшення напруги на затворі зі стандартних 15 до 11 В. Проте, слід зазначити, що збільшення густини пакування вертикальних осередків призвело до істотного зростання вхідної ємності приладу, що у свою чергу підвищило потужність керування ключем і знизило його швидкодію.

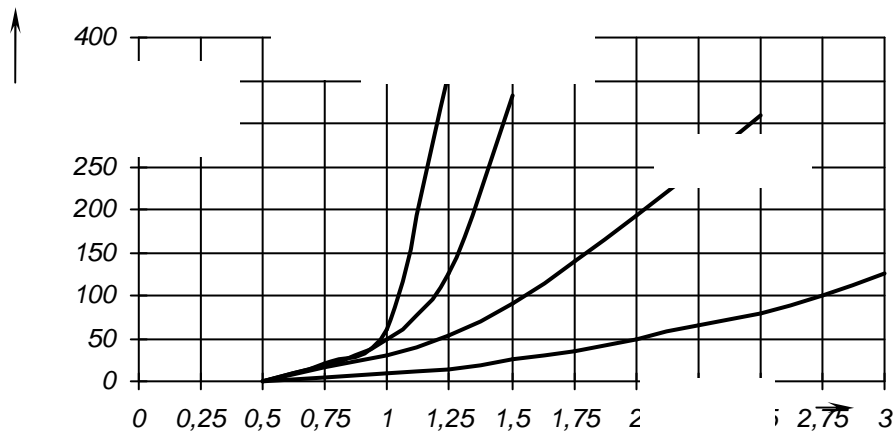


Рис. 2. Порівняння ВАХ IGBT-ключів різних поколінь з характеристикою діода

Нарешті у 2004 році все тією ж компанією Mitsubishi Electric було представлено п'яте покоління IGBT, що отримало назву GSTBT (Carrier Stored Trench Gate Bipolar Transistor), тобто біполярні транзистори з ізольованим вертикальним Trench-затвором з накопиченими носіями. Транзистори мають додатковий n-шар, що створює бар'єр, який перешкоджає проходженню дірок з базового епітаксialного шару в р-емітер. Це сприяє накопиченню носіїв в базовому шарі IGBT на межі з емітером і зниженню залишкової на-

пруги до 1,8 – 2,0 В. Тепер не застосовується гібридна RTC-схема для обмеження струму короткого замикання, оскільки проблему струмового перевантаження було вирішено в самому кристалі IGBT завдяки новій технології Plugget Celf Merget (PCM), за якої забезпечується оптимізація «кроку» вертикальних осередків затвора завдяки підключенню тільки необхідної їх кількості, що забезпечує відносно низький струм насичення при перевантаженні і зниження вхідної ємності.

Таким чином, протягом останніх десятиліть зусилля розробників IGBT-ключів було постійно спрямовано на зниження залишкової напруги, підвищення швидкодії та стійкості перемикачів при все зростаючих значеннях струмів і блокуючих напруг приладу. Причому поставлені завдання вирішуються з кожним роком все більш якісно. Так фірма Toshiba Semiconductor розробила біполярний транзистор з ізольованим затвором і підвищеною інжекцією IEGT (Injection Enhanced Gate Transistor). Він має пряму (залишкову) напругу і густину струму, що відповідають потужним біполярним (звичайним) тиристорам, а динамічні параметри перемикачів характерні для IGBT. Зараз виробляється кілька типів IEGT-модулів притискової та паяної конструкцій, у тому числі і надпотужних на струм 750 А і напругу 6,5 кВ.

Технологічна революція 80-х років не могла не торкнутися тиристорної ключової електроніки, що стоїть дещо осторонь на непохитних позиціях великої потужності. До середини 80-х років цей клас приладів поповнюється структурами з польовим вмиканням, названі МСТ (Mos Controlled Thyristor). Вони відпираються та запираються полем при дуже високій густині струму (більше 2000 А/см<sup>2</sup>). Проте розробка цих перспективних приладів зіткнулася з серйозною проблемою – різким зниженням допустимої густини струму із зростанням числа структуроутворюючих елементів. Значних успіхів на той період досягла технологія тиристорів, що запираються або двоопераційних тиристорів – GTO (Gate Turn-Off Thyristor). Хоча теоретичний принцип запирання р-п-р-п-структури по електроду керування був відомий ще з початку 60-х років, але тільки розробка інтегральних багатоосередкових структур дозволяє налагодити перші серійні випуски потужних GTO до середини 70-х років. Технологічні успіхи 80-х років дозволяють фірмам-виробникам майже у 100 разів підвищити потужність, що перемикається GTO (до 2,5 кА за струмом і 4,5 кВ за напругою). Залежно від блокованої зворотної напруги, розрізняють структури без шунтування анодного переходу і з шунтуванням, а також структури з вбудованим зворотним діодом. Дві останні мають меншу залишкову напругу, і хоча окремі типи двоопераційних тиристорів було розроблено для високочастотних схем середньої потужності, основне вживання GTO – в потужних колах середньої напруги, де не можуть бути використані біполярні і польові транзистори. Наприклад, до середини 80-х років на GTO було розроблено інвертори напруги для двигунів електровозів. Це дозволило замінити на залізничному транспорті двигуни постійного струму на більш економічні і надійні двигуни змінного струму. Після успіхів у технології GTO галузі застосування звичайних тиристорів (SCR) істотно звужуються. Їхній розвиток йде шляхом підвищення робочих струмів і напруг і до кінця 80-х років їх вже виробляють на граничні струми до 3 кА і напруги до 6 кВ.

Конкуренцію двоопераційним тиристорам складають індукційні тиристири (SITh-Static Induction Thyristor), що застосовуються в тих же класах вентильних перетворювачів і виконуються за комбінованою технологією. Важливою перевагою індукційних тиристорів (IT) порівняно з GTO є низьке пряме падіння напруги за відносно високих робочих напруг. Проте такі їхні недоліки, як здатність проводити струм при нульовому зміщенні на затворі, а також складна і дорога технологія виготовлення поки стримують широке застосування.

Наступ комбінованих технологій на позиції біполярних тиристорів, що вважалися неприступними, примушує розробників цих приладів рухатися далі в область мегаватних потужностей. Так компанія Mitsubishi Electric розробила GTO на струм 6 кА і на напругу 6 кВ, виконаний за багатоосередковою технологією на шестидюймовій кремнієвій пластині в спеціальному корпусі з молібденовими дисками (термокомпенсаторами), що відділяють

пластину від мідних частин анода і катода. Коефіцієнт запирання у нього дорівнює приблизно (5 – 6), а час вимикання близька 5 мкс. Тиристор витримує ударні струми до 40 кА і має залишкову напругу при цьому не більше 6 В. Ці унікальні досягнення стали можливими завдяки оптимізації процесу шунтування анодного р-п-переходу і створенню нерівномірного розподілу терміну життя носіїв в області широкої п-бази, а також введенню додаткового високолегованого п+-шару в прианодну частину п-бази (так звана структура р-п-ν-р-п).

Надпотужні одноопераційні тиристори зараз виробляються на основі надвисоковольтної технології (Ultra High Voltage) і мають параметри потужності 8 кВ і 3,6 кА для ліній передачі постійного струму та 12 кВ і 1,5 кА для статичних перемикачів змінного струму. Керування подібними структурами виконується світловим імпульсом по спеціальному оптичному кабелю.

В кінці 90-х років тією ж фірмою були розроблені тиристорні структури з комутацією струму в затвор керування, названі GCT (Gate Commutated turn-off Thyristor). Слід зазначити, що робота GCT можлива тільки при спеціальній конструкції корпусу що забезпечує зниження індуктивності виводів керування до (2 – 4) мкГн. Ця проблема легко розв'язується при поєднанні GCT і пристрою формувача імпульсів керування в єдиній конструкції, названій інтегрованим GCT або IGCT. Сьогодні ці прилади виробляються фірмами ABB Semiconductors і Mitsubishi Electric у корпусах таблеток притискної конструкції і розраховані на напругу 6 кВ та на струм 4,5 кА.

Загальну діаграму сучасного рівня розглянутих силових НК в координатах представлених струмів, напруг і частот наведено на рис. 3, а технічні характеристики достатньо детально відображено в довідкових каталогах та інших інформаційних матеріалах провідних зарубіжних фірм, що займаються розробкою і випуском цих виробів, серед яких, у першу чергу, слід зазначити Infineon Technologies, Mitsubishi Electric, Semicron та Motorola.

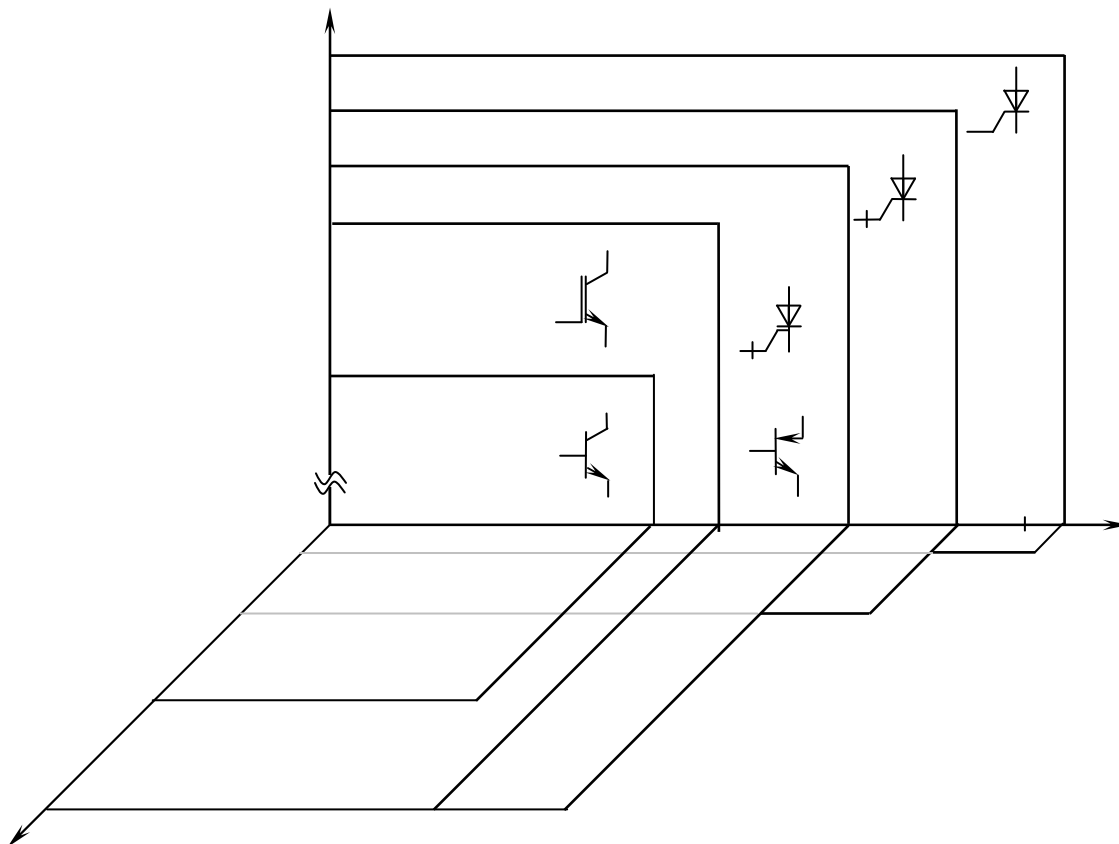


Рис. 3. Діаграма сучасного рівня розвитку силових НК

Слід зазначити, що дуже хороші перспективи в розвитку сучасних керованих НК відкриваються у зв'язку з вживанням нових напівпровідникових матеріалів, перш за все карбіду кремнію (SiC), що дозволяє істотно зменшити струми витоку і опір приладу у відкритому стані, а також підвищити робочу температуру кристала до 600 °С проти (150 – 200) °С для кремнію.

### Висновки.

1. У результаті динамічного розвитку електронних технологій, особливо в останні два десятиріччя, було створено надпотужні як напівкеровані, так і повністю керовані НК, що за своїми параметрами все більше наближуються до ідеальних ключів. Це забезпечило наявність широкої пропозиції вказаних НК на світовому ринку компонентів силової електроніки за доступної ціни й високої якості.

2. Застосування нових напівпровідникових ключів в комутаційних напівпровідникових апаратах дозволить при використанні нових схемних рішень зменшити їх масу, габарити і вартість, підвищити швидкодію і переважувальну здатність, розширити функціональні можливості знов створених вдосконалених виробів.

3. Конкурентоспроможність напівпровідникових апаратів постійно зростатиме, що обумовлено як досягненнями у галузі силової електроніки, так і все зростаючими вимогами сучасних систем електропостачання до якості електричних апаратів.

### Література

1. Сосков А.Г., Соскова И.А. Полупроводниковые аппараты: коммутация, управление, защита: Учебник / Под ред. А.Г.Соскова. – К: Каравелла, 2005. – 344 с.
2. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Издательский дом «Додэка - XXI», 2005 – 384 с.
3. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник / За ред. А.Г. Соскова. – К.: Каравела, 2007. – 384 с.
4. Запираемые тиристоры /М. Адзума, М. Курата . ТИИЭР. Т.76, №4, 1998, с. 128 – 137.
5. Силовые полупроводниковые приборы. Обзор / Ф.П. Хауэр. ТИИЭР. Т.76, №4, 1998, с. 36 – 46.
6. Силовые полупроводниковые приборы: Пер. с англ. / Под ред. В.В. Токарева. Изд. 1-е. – Воронеж, 1995, с. 257.
7. Силовые IGBT-модули. Материалы по применению. – М.: Додека, 1997, с. 321.
8. Современные решения в области промышленной и силовой электроники на основе электронных компонентов фирмы Infineon Technologies AG. Материалы семинара. М. 2000, 203
9. Уильямс Б. Силовая электроника: приборы, применение, управление. Справочное пособие: пер. с англ. – М. Энергоатомиздат, 1993, с.327.
10. Флоренцев С.Н. Состояние и тенденции развития силовых IGBT-модулей. Электротехника. 2008, №4, с. 27 – 35.
11. Eschrich F. IGBT Modules Simplify Inverter Design. Fuji Electric, Frankfurt, Germany. PSIM Europe, 1996, p. 82.
12. H. Matsuda. New Advanced Power Semiconductors Toshiba Corporation. Power Conversion. May, 1999, p. 139.
13. M. Marr, A. Knapp, M. Billmann. High-speed 600 V IGBT in NPT technology. Siemens AG, Semicron Electronic GmbH, 2006, p. 117.
14. Mitsubishi Semiconductors. High Power Semiconductors. Sep. First Edition 1995. Published by Mitsubishi Electric Corp., Semiconductor Marketing Division. P. 193.
15. Грехов Н.В. Силовая полупроводниковая электроника и импульсная техника. Вестник Российской Академии Наук, 2008, том 78, № 2, с. 106 – 131.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ УПРАВЛЯЕМЫХ  
СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА РАЗВИТИЕ  
КОММУТАЦИОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ АППАРАТОВ

А.Г. Сосков, Ю.П. Колонтаевский, Я.Б. Форкун, Н.О. Сабалаева, И.А. Соскова

*Проведен обзор основных исторических этапов разработки силовых полупроводниковых ключей и выполнен анализ современного состояния развития управляемых силовых полупроводниковых приборов; сделан прогноз относительно перспективы развития современных управляемых полупроводниковых ключей.*

CURRENT SITUATION AND TENDENCIES OF EVOLUTION OF CONTROLLED POWER  
SEMICONDUCTOR DEVICES AND ITS INFLUENCE ON DEVELOPMENT OF  
COMMUTATION SEMICONDUCTOR APPARATUS

A.G. Soskov, Y.P. Kolontaevsky, Y.B. Forkun, N.O. Sabalaeva, I.A. Soskova

*The review of basic history design times of the power semiconductor keys is studied and the analysis of current situation of the evolution of controlled power semiconductor devices is executed; a prognosis in relation to the prospect of development of the modern controlled power semiconductor keys is done*